

DOI: 10.20103/j.stxb.202501240193

邢衍阔, 王震, 鹿志创, 韩家波, 杜静, 高祥刚, 吴英超, 孔重人, 田甲申. 西太平洋斑海豹觅食迁徙行为分析与适宜栖息地预测. 生态学报, 2025, 45(19): - .

Xing Y K, Wang Z, Lu Z C, Han J B, Du J, Gao X G, Wu Y C, Kong Z R, Tian J S. Analysis of foraging and migration behavior of spotted seals and prediction of suitable habitats. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(19): - .

西太平洋斑海豹觅食迁徙行为分析与适宜栖息地预测

邢衍阔^{1,2}, 王震^{1,2}, 鹿志创^{1,2}, 韩家波^{1,2}, 杜静^{1,2}, 高祥刚^{1,2}, 吴英超^{1,2}, 孔重人^{1,2}, 田甲申^{1,2,*}

1 辽宁省海洋水产科学研究院, 大连 116023

2 大连市濒危海洋哺乳动物保护生物学重点实验室, 大连 116023

摘要: 了解和掌握濒危动物栖息地的适宜性及其活动规律, 对于科学保护该物种和维护海洋生态系统至关重要。西太平洋斑海豹 (*Phoca largha*) 作为黄渤海海域生态系统中的旗舰物种, 明确其栖息地范围和迁徙过程中的行为状态特征, 是保护该种群及其栖息环境的基础。对 2023 年和 2024 年救助并成功放归野外的 6 头斑海豹幼崽进行了信标标记, 通过 Argos 系统进行了信标跟踪, 并利用信标数据对其分布和行为状态进行分析。基于最大熵模型 (MaxEnt) 利用 3986 个信标记录和 8 个环境数据, 对斑海豹的适宜栖息地进行预测; 采用状态空间模型 (SSM) 对斑海豹的运动状态进行预测。结果表明: (1) 优化后的 MaxEnt 模型预测准确, AUC 值 > 0.9, 模型预测结果可靠; (2) 海表温度对模型贡献率为 81.4%, 是影响斑海豹分布的主导环境因子; (3) 斑海豹适宜生境主要分布在我国渤海的北部和东部海域、黄海的北部和东部海域及俄罗斯的彼得大帝湾海域; (4) 斑海豹觅食和休息区域分布在渤海东部、渤海海峡和彼得大帝湾海域, 在迁移过程中觅食和休息行为较少, 表明其正在快速完成迁移活动。研究结果可为斑海豹种群的保护与恢复提供重要参考, 同时为推动区域生物多样性保护和生态系统管理提供科学支撑。

关键词: 西太平洋斑海豹; 信标跟踪; 最大熵模型; 栖息地; 运动特征

Analysis of foraging and migration behavior of spotted seals and prediction of suitable habitats

XING Yankuo^{1,2}, WANG Zhen^{1,2}, LU Zhichuang^{1,2}, HAN Jiabo^{1,2}, DU Jing^{1,2}, GAO Xianggang^{1,2}, Wu Yingchao^{1,2}, KONG Zhongren^{1,2}, TIAN Jiashen^{1,2,*}

1 Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute, Dalian 116023, China

2 Dalian Key Laboratory of Conservation Biology for Endangered Marine Mammals, Dalian 116023, China

Abstract: Understanding and mastering the habitat suitability and activity patterns of endangered species is crucial for the scientific conservation of these species and the maintenance of marine ecosystems. The spotted seal (*Phoca largha*) is the flagship species in the ecosystem of the Yellow and Bohai Seas. Identifying the habitat range and behavioral characteristics during migration is the foundation for protecting the population and habitat environment. In this study, six spotted seals pups that were rescued and successfully released into the wild in 2023 and 2024 were tagged with transmitters. The tracking data were collected through the Argos system, and the distribution and behavior of the seals was analyzed using the tracking data. Based on the MaxEnt model, we predicted the suitable habitats of spotted seals using 3986 beacon records and 8 environmental variables. Additionally, the State-Space Model (SSM) was used to predict the movement states of the spotted seals. The results showed that: (1) By calling the ENMeval package for model optimization, FC = LQHPT and RM = 0.5

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42276141); 中国海油海洋环境与生态保护公益基金 (CF-MEEC/TR/2024-3)

收稿日期: 2025-01-24; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tianjiashen@163.com

were ultimately determined. The model accuracy after optimizing the parameters was better than that under the default parameters. The optimized MaxEnt model provided accurate predictions with an AUC value greater than 0.9, indicating the reliability of the model. (2) Sea surface temperature contributed 81.4% to the model, making it the dominant environmental factor influencing the distribution of spotted seals. Other environmental factors contribute relatively little to the model, but they also have a certain influence on the distribution of spotted seals. (3) The suitable habitats for spotted seals were mainly distributed in the northern and eastern waters of the Bohai Sea, the northern and eastern waters of the Yellow Sea, and the Peter the Great Bay in Russia; (4) The average tracking time of the six marked spotted seals was 65.5 days, and the migration lasted for about one month. The foraging and resting areas of spotted seals were distributed in the eastern part of the Bohai Sea, the Bohai Strait and Peter the Great Bay, while the areas with high mobility persistence were mainly concentrated in the central part of the Bohai Sea, the northern part of the Yellow Sea and the coast of the Korean Peninsula. During the migration process, there were relatively few foraging and resting behaviors, indicated that they were rapidly completing their migration activities. The results of this study provide important references for the conservation and recovery of spotted seal population and offer scientific support for promoting regional biodiversity conservation and ecosystem management.

Key Words: *Phoca largha*; satellite-tracking; MaxEnt; habitat; movement

西太平洋斑海豹(*Phoca largha*)又称斑海豹,是唯一能在我国海域繁殖的鳍足类海洋哺乳动物^[1]。辽东湾结冰区是斑海豹世界上八个繁殖区中最南端的一个,每年 10—11 月,斑海豹穿越渤海海峡进入到渤海海域,翌年 1—2 月在辽东湾北部冰区繁育,3—4 月在渤海海域栖息,4 月中下旬至 5 月上旬陆续离开渤海,前往黄海北部如韩国的白翎岛海域,部分个体游至俄罗斯的彼得大帝湾海域,但也有少数群体常年栖息在渤海水域^[2]。黄渤海作为典型的半封闭海域,生态系统多样,鱼类资源较为丰富,为斑海豹提供了重要的栖息地。作为该区域的旗舰物种,其种群数量仅占斑海豹总数的 0.31%^[3]。由于 20 世纪 70—90 年代,人类的捕杀、对海洋资源过度的开发和利用等因素,导致其栖息环境遭受一定程度的破坏,种群数量大幅下降,已有约 80% 的个体消失^[4]。随着生态文明建设和生物多样性保护成为国家战略发展目标,生物多样性得到了广泛关注,并在生物多样性保护、生态系统恢复及资源合理利用方面取得积极进展。斑海豹种群数量逐渐恢复,目前我国斑海豹种群约有 2000 头,已被列为国家一级保护野生动物^[5-6]。然而,栖息地丧失、气候变化以及人类活动(如航运、渔业、海洋工程等)仍可能对其生存和迁徙模式产生深远影响^[7]。斑海豹对环境变化的响应机制尚不明确,其适宜栖息地和迁徙路径是否受到人为活动的干扰,仍需进一步探讨。因此,系统研究斑海豹的栖息地利用模式及迁徙行为,不仅有助于揭示该物种的生态适应策略,还能为科学制定保护措施提供支持,推动该物种的长期保护及栖息环境的可持续管理。

准确记录濒危物种的时空分布数据,能够有效约束人类活动与物种间的关系^[8]。研究濒危物种的栖息地利用模式和迁徙行为,有助于识别这些物种的重要栖息地,分析人类活动在空间和时间尺度上可能产生的影响^[9]。近年来,随着野生动物追踪技术和分析方法的不断发展,为濒危物种分布信息的收集提供了技术支撑^[10]。对于分布广泛的迁徙物种而言,信标跟踪数据是研究其分布范围及生物重要性区域(核心利用区)的最有效手段之一^[11]。然而,信标跟踪技术也存在一定局限性,例如标记样本数量有限、信标电池寿命较短、设备脱落或故障等因素制约,导致跟踪时间不足,从而无法全面反映目标物种的所有活动区域^[12]。为克服这些限制,可利用卫星收集的运动数据结合物种分布模型,预测物种的相对适宜栖息地,从而弥补数据不足的缺陷^[13]。

物种分布模型(species distribution model, SDM)通过分析物种出现数据与环境数据之间的统计关系,并将其用于预测物种栖息地适宜性^[14]。目前常用的模型算法主要有包络算法、距离算法、回归算法、分类算法、机器学习算法、最大熵、数学模型和贝叶斯网络 8 类,其中使用最为广泛的极大熵模型(MaxEnt)仅需物种的存

在数据,在样本数量有限或分布稀疏的情况下,仍能提供较好的预测结果,并有效量化环境变量的贡献度^[15]。对于许多海洋迁徙物种而言,由于观测数据在时间和空间上的局限性,通常只能反映个体生物学活动的一小部分。相比之下,信标跟踪能够实现半连续的数据收集,突破传统观测的限制^[12]。物种分布模型与信标结合的方法在海洋生境中得到了广泛应用,例如,Hazen 等人^[16]使用 23 种太平洋顶级捕食者的 4300 个卫星信标数据构建物种分布模型预测未来气候变化条件下适宜栖息地的变化情况。该方法不仅有助于揭示珍稀濒危物种的分布特征,还可用于评估气候变化对其分布范围的影响,为保护区的合理划定提供技术支持^[16-17]。

状态空间模型(State-Space Model,SSM)是一种处理动物追踪数据的强大工具,能够对数据进行质量控制并推断动物行为状态^[18]。在该模型中,动物的真实位置或行为被视为未观测状态,而信标记录的数据则作为观测值。SSM 通过结合运动过程模型(如相关随机游走)与测量模型,将观测数据与动物轨迹相匹配,从而推断动物的真实位置和行为状态(如觅食、迁徙、休息)^[19]。凭借其灵活性,状态空间模型(SSM)已被广泛应用于动物迁徙轨迹分析、行为模式识别以及生态系统动态建模,为解释和预测复杂的生态数据提供了有力支持^[20]。

本研究利用斑海豹的信标跟踪数据,结合 MaxEnt 模型和 SSM 模型,对其分布和行为状态进行分析。首先采用 MaxEnt 模型对斑海豹的适宜分布区进行预测,通过分析斑海豹分布数据与环境变量的关系,评估关键环境因子对其分布的影响;其次结合状态空间模型(SSM)对斑海豹迁徙过程中的行为状态进行探究;通过识别斑海豹的迁徙轨迹与行为模式,包括迁徙、觅食和休息等活动状态的切换,揭示斑海豹在海洋环境中的动态适应策略。综合两种模型的分析结果,为评估环境变化对该物种的分布和行为的潜在影响,并为实施有效的保护和管理措施提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 样本来源

斑海豹幼崽样本来自于 2023 年和 2024 年辽宁省海洋水产科学研究院在辽宁海域救助的野外搁浅个体(年龄均不足 1 月),选取 6 头斑海豹信标跟踪结果用于本研究分析,其中 2023 年 5 头,2024 年 1 头。在救助过程中,严格遵循《斑海豹救助和放归技术规程》(DB21/T 3364)的相关要求。斑海豹在放归前接受了全面的救治和康复,并进行了系统的野化训练,野化训练期间,投喂活饵时间长达两周以上,以确保其完全具备捕食活饵的能力;定期监测每头斑海豹的健康状况,确保放归个体体重达到 25kg 以上,并经科学评估后放归入海。放归前,为每头斑海豹安装信标,以便跟踪其放归后的行为和分布动态。具体信息详见表 1。

表 1 信标跟踪斑海豹个体信息和对应的信标编号

Table 1 Summary information of tagged spotted seals and their position transmitting tag (PTT) numbers

信标编号 PTT number	体重 Weight/kg	性别 Gender	救助日期 Rescue date	放归日期 Release date	信号结束日期 Signal end date	信标持续时间 Tagged duration/day
182228	32.0	雄性	2024.2.18	2024.4.16	2024.6.1	47
236339	34.5	雌性	2023.2.27	2023.4.16	2023.8.13	120
236340	25.5	雄性	2023.2.20	2023.4.16	2023.5.6	21
236341	29.0	雄性	2023.2.23	2023.4.16	2023.5.13	28
236342	35.5	雌性	2023.2.19	2023.4.16	2023.8.14	121
236343	29.5	雄性	2023.2.1	2023.4.16	2023.6.10	56

PPT:位置传输标签 Position transmitting tag

1.2 信标标记

在放归前 1—2 天进行信标安装。安装前,提前将斑海豹置于保定笼中,确保信标粘贴处的毛发处于干燥状态。使用快固型环氧树脂粘合剂在信标粘贴处和斑海豹颈后部(以不影响斑海豹颈部的正常活动为宜)分别涂抹,然后按压 10min 使其牢靠固定,1h 内避免粘接处沾水。

采用美国 Wildlife 公司制造的 SPOT5 型号信标用于跟踪调查工作。信号频率为 401.65MHz,重 110g,发射持续时间设定为 42—80s/次,当信标处于水面上时可发送定位信号,并通过 Argos 系统进行信号接收,研究期间共获得斑海豹分布数据 3986 个。

1.3 斑海豹分布数据筛选

在 Argos 系统中,定位信号的精度被划分为 6 个等级,每个等级表示不同的定位准确性。这些等级通常划分为:3 级定位误差小于 250m;2 级定位误差在 250—500m;1 级定位误差在 500—1500m;0 级定位误差超过 1500m;A、B 级无精度估计^[21]。为保证准确度,仅选择 3 级、2 级和 1 级的 Argos 定位信息。同时,为减少采样偏差的影响,利用 spThin 包对信标数据进行了整理,共筛选出 829 个分布点^[22]。

1.4 环境数据选择

本研究环境数据选取叶绿素 a、海表温度、水深、溶解氧、盐度、初级生产力、海底坡度、硝酸盐共 8 个环境变量。其中水深数据来自 GMED (Global Marine Environment Datasets, <https://gmed.auckland.ac.nz/>),其余数据均来自 Bio-ORACLE (<https://bio-oracle.org/>) 分辨率均为 0.05°。由于环境因子间的共线性可能导致模型过拟合,因此需对环境变量进行相关性分析^[23]。通过 ArcGIS 中的 Band Collection Statistics 工具,对 8 个环境变量进行 Pearson 相关性分析,并筛选出绝对值相关系数<0.8 的变量用于模型构建。最终保留海表温度、水深、溶解氧、初级生产力、海底坡度和硝酸盐 6 个环境变量。

1.5 MaxEnt 模型构建

在模型构建过程中,两个关键参数调控倍频 (Regularization multiplier, RM) 和特征组合 (Feature class, FC) 的调整对于提升模型的预测性能至关重要^[13]。RM 决定了在模型中包含变量或其变换时的阈值高低,较高的 RM 值会对模型复杂度施加更强的惩罚,有助于防止过度拟合^[24]。模型构建依赖于不同类型的 FC,选择合适的 FC 能有效提升模型的表现和预测能力^[24]。研究使用 ENMeval 包设置 RM 值为 0.5—5,间隔为 0.5,FC 设置为 L、H、LQ、LQH、LQHP 和 LQHPT6 种特征组合。AICc 赤池信息量准则 (Akaike information criterion correction, AICc) 是衡量模型拟合优良性常用标准,AICc 值越小表明所选 FC 和 RM 的组合最优,模型预测性能最好。因此,选择最小 AICc 值所对应的 FC 和 RM 组合进行模型构建^[25]。Maxent 模型中设置随机选取 75% 的分布数据用于建模,25% 的数据用于模型验证,模型重复运行 10 次,取平均值作为最终预测结果。使用受试者工作特征 (Receiver operating characteristic, ROC) 曲线下面积 (Area under the ROC curve, AUC) 作为判断模型预测准确度的指标。AUC 的取值范围在从 0 到 1, AUC 值越大表明模型预测性能越高,当 AUC 值 ≤ 0.6 时,模型预测不成功, $0.6 < \text{AUC} \leq 0.7$ 预测结果较差, $0.7 < \text{AUC} \leq 0.8$ 预测结果一般, $0.8 < \text{AUC} \leq 0.9$ 预测结果良好, $0.9 < \text{AUC} \leq 1$ 预测结果优秀^[26]。将输出结果导入 ArcGIS10.7 中,采用重分类工具使用人工分级 (Manual Classification) 方法将栖息地划分为非适生区 (适宜度<0.2)、低适生区 ($0.2 \leq \text{适宜度} < 0.5$)、中适生区 ($0.5 \leq \text{适宜度} < 0.7$) 和高适生区 ($0.7 \leq \text{适宜度}$)^[27]。

1.6 SSM 模型构建

利用 R 语言中的 aniMotum 包,构建斑海豹的 SSM 模型^[19]。在模型构建过程中,为确保数据的准确性和可靠性,参考灰海豹 (*Halichoerus grypus*) 的研究结果,对原始数据进行了预处理,排除超过最大速度阈值 3m/s 的数据^[28]。SSM 模型通过综合考虑多种位置不确定性因素,包括 Argos 位置质量等级、半长轴、半短轴以及椭圆方向,对斑海豹的分布数据进行了优化和规则化处理,最终以 12h 的固定时间间隔输出改进后的位置估计。这一方法的应用旨在提高位置估计的精度,并为后续的行为模式分析提供更为可靠的数据基础^[19]。移动持久性 (γ_i) 作为评估动物运动行为的重要指标,是一个在 0 (低持久性) 至 1 (高持久性) 区间内随时间连续变化的潜在变量^[19]。该指标依据移动速度和方向的自相关性来反映运动模式的动态变化^[29]。因此,低移动持久性标志着动物的居留行为状态 ($0 < \gamma_i \leq 0.5$),这通常与休息和觅食活动相关;高移动持久性标志着动物的快速移动状态 ($0.5 < \gamma_i \leq 1$),通常与迁徙行为相关^[30]。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt 模型精度评价

MaxEnt 建模参数优化结果见表 2,最小信息准则 AICc (Delta.AICc) 和训练集 AUC 与测试集 AUC 平均差值 (Avg.diff.AUC) 都小于默认值,优化后可以降低模型的拟合度和复杂度,提高模型的精确性。当 delta.AICc = 0 时,FC=LQHPT, RM=0.5, 表明该参数下模拟结果最优。在该参数下,对斑海豹的适宜分布区进行预测,经 10 次重复后,平均 AUC 值为 0.992,表示结果模型预测精确度高,结果准确。

表 2 MaxEnt 模型 Enmeval 优化评价指标

Table 2 Evaluation metrics of MaxEnt model generated by Enmeval

类型 Type	特征组合 Feature class	调控倍频 Regularization multiplier	最小信息准则 AICc Delta. AICc	训练集 AUC 与 测试集 AUC 差值 Avg.diff.AUC
默认 Default	LQHPT	1	45.000	0.00836
优化 Optimized	LQHPT	0.5	0	0.00811

AUC:受试者工作特征曲线下面积 The area under the subject curve; LQHPT:线性特征 (Linear features, L) + 二次型特征 (Quadratic features, Q) + 片段化特征 (Hinge features, H) + 乘积型特征 (Product features, P) + 阈值性特征 (Threshold features, T); Delta. AICc: 最小信息准则 AICc The minimum information criterion AICc value; Avg.diff.AUC: 训练集 AUC 与测试集 AUC 平均差值 Average difference between the training and testing AUC

2.2 环境变量重要性评估

由表 3 可知,6 个环境变量对斑海豹栖息地预测模型构建中的贡献程度不同,从高到低为:硝酸盐、海表温度、水深、溶解氧、海底坡度、初级生产力,前三者贡献率值较高,表明模型的建立主要参考的是斑海豹分布数据与附近盐度、海表温度和水深之间的关系;6 个环境变量对预测结果的重要性排列从大到小为:海表温度、硝酸盐、水深、溶解氧、海底坡度、初级生产力。海表温度的重要性 81.4%,显著高于其他变量,表明海表温度是对斑海豹适宜栖息地影响最大的变量,但同时,贡献率不是最高,说明了模型的构建参考海表温度没有硝酸盐多,由此可以反应出适宜海表温度对斑海豹而言是一个基本生存条件,但其适宜度仍需在一一定的硝酸盐范围内才能达到较高水平。

表 3 筛选后环境变量因子贡献率与排列重要性

Table 3 The contribution rate and importance of filtered environmental variables

环境变量 Environmental variable	对模型贡献率 Contribution rate/%	对结果重要性 Importance/%	环境变量 Environmental variable	对模型贡献率 Contribution rate/%	对结果重要性 Importance/%
硝酸盐 Nitrate	40.4	11.2	溶解氧 Dissolved oxygen	8.8	1.8
海表温度 Sea surface temperature	30	81.4	海底坡度 Slope	1.4	0.9
水深 Depth	18.4	4.5	初级生产力 Primary productivity	1	0.2

2.3 斑海豹适宜栖息地预测

斑海豹的栖息地预测结果如图 1 所示,斑海豹在黄渤海海域广泛分布,高适生区主要分布于渤海辽东湾近岸和黄海东部海域,分别为辽东湾的秦皇岛至葫芦岛海域、盘锦辽河口海域、大连渤海海域和烟台庙岛群岛附近海域,以及黄海东部白翎岛附近海域,面积约为 $3.397 \times 10^4 \text{ km}^2$;中适宜区主要位于渤海中部海域以及黄海北部近岸海域,面积约为 $6.135 \times 10^4 \text{ km}^2$;低适生区主要位于渤海湾、莱州湾和黄海北部部分海域,面积约为 $9.867 \times 10^4 \text{ km}^2$;在俄罗斯彼得大帝湾也有斑海豹的适宜分布区域。

2.4 迁徙行为和运动状态

标记的 6 头斑海豹中,平均跟踪时间为 65.5d (范围从 21—121d),其中信标编号 236342 跟踪时间最长为 121d。信标跟踪显示,这些个体在最初的两周内,沿辽东湾东部近岸向北迁徙到达辽东湾最北部。随后沿辽

东湾西岸向南迁徙,直到4月底经渤海海峡离开渤海迁徙到黄海东部白翎岛,在此过程中部分个体沿黄海北部迁徙,另一部分个体沿山东半岛北部近岸迁徙到白翎岛。在到达白翎岛后,有部分个体沿朝鲜半岛近岸迁徙,在5月底到达俄罗斯彼得大帝湾。在整个迁徙过程中,斑海豹的持久性运动状态分布区域不同。低移动持久性区域主要分布在渤海东部、渤海海峡和彼得大帝湾,这些地区通常是斑海豹休息和捕食的主要场所。而高移动持久性区域则主要集中在渤海中部、黄海北部以及朝鲜半岛沿岸,反映了斑海豹在迁移过程中的活动区域(图2)。

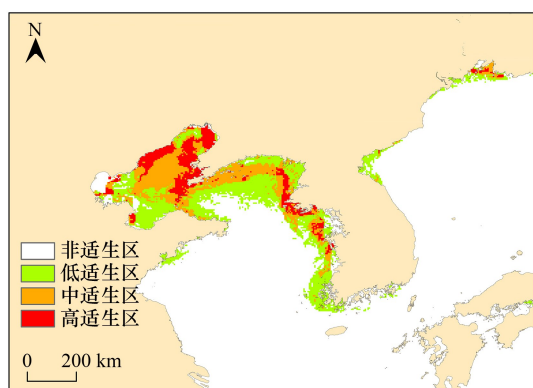


图1 斑海豹的适宜栖息地分布

Fig.1 The suitable habitat distribution of spotted seal

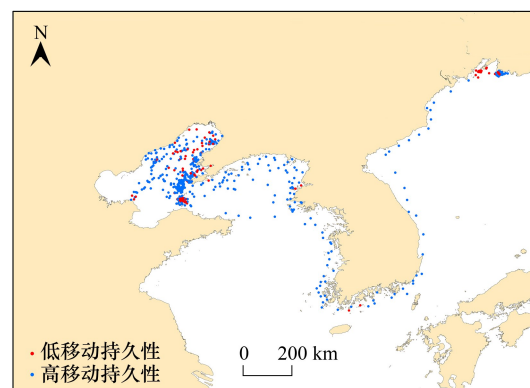


图2 斑海豹移动持久性

Fig.2 Move persistence of the spotted seal

3 讨论

3.1 斑海豹适宜分布与重要环境变量

斑海豹作为冷温性海洋哺乳动物,水温不仅直接影响其生理和行为,还可通过改变猎物、捕食者和致病媒介的分布间接影响它们^[31]。在冬季,健康的斑海豹的脂肪层厚度能达到3—6cm,具有较高的耐寒性;夏季脂肪减少,脂肪层厚度2—3cm,用于适应高温^[32]。高温环境可能导致斑海豹出现生理不适,摄食减少甚至停止进食,对斑海豹生存产生一定的影响。斑海豹作为机会主义的顶级掠食者,其摄食结构以鱼类为主,并受特定地区和季节的影响,同时依赖于特定食物的可获得性^[33]。斑海豹的猎物分布在一定程度上取决于海水温度和盐度特征,这些特征反映了它们的空间分布和季节变化^[34]。不同温度水团之间的边界可能具有极大的温度差,可以聚集浮游动物并吸引更高营养级的捕食者和各种鱼类^[35]。斑海豹的摄食随季节和温度的变化发生显著改变,在一年的不同时间,斑海豹通常会捕食数量最多和最容易获得的猎物^[33]。彼得大帝湾斑海豹群体春季以细身宽突鳕(*Eleginus gracilis*)、胡瓜鱼(*Osmerus mordax*)、黄线狭鳕(*Gadus chalcogrammus*)和其他头足类为主要食物,而在秋冬季节则以细身宽突鳕(*Eleginus gracilis*)和胡瓜鱼为主要食物^[33]。白令海斑海豹群体猎物获取与海水温度联系更为密切,通常在底部温度较低的水域觅食,这些水域往往含盐量较高,且猎物丰富,多以毛鳞鱼(*Mallotus villosus*)和北极鳕(*Boreogadus saida*)为主,而温度是升高后猎物改变为大头鳕(*Gadus macrocephalus*)^[36]。黄渤海斑海豹群体季节性摄食也有差异,春季斑海豹捕食鲱鱼(*Clupea pallasii*)、玉筋鱼(*Ammodytes personatus*)和小黄鱼(*Larimichthys polyactis*),秋冬季节则多以鲛鱼(*Liza haematocheila*)为主要食物^[37]。

分布模型预测结果适生区域与当前已知斑海豹分布范围相吻合。尽管整个渤海虽然都有斑海豹分布,但高适生区主要集中在辽东湾和渤海海峡海域。已知斑海豹在渤海沿岸主要有四处栖息地,分别是辽宁的辽河口、虎平岛、蚂蚁岛和山东庙岛群岛海域,这些区域是斑海传统聚集地。其中,辽河口、蚂蚁岛和虎平岛海域常有数百头斑海豹聚集,庙岛群岛也有数十头斑海豹^[38—39]。分布模型预测结果中适生区域与当前已知斑海豹分布范围相一致,表明该模型在预测斑海豹的潜在分布方面具有较高的准确性。黄海海域斑海豹主要适生区

位于黄海北部和东部海域,其中韩国白翎岛也是斑海豹传统聚集地^[40]。在彼得大帝湾,预测的栖息地范围小于已知的实际情况,这可能是由于用于构建模型的斑海豹分布数据量不足,使得模型未能充分反映斑海豹栖息地的完整范围。

3.2 斑海豹行为状态

斑海豹在渤海内的觅食和休息行为主要发生在渤海东侧和渤海海峡附近。在一些物种中观察到了觅食行为与猎物密度之间存在线性关系,例如阿氏前口蝠鲼(*Manta alfredi*)^[41]。因此,斑海豹低移动持续性的觅食行为活动可能发生在猎物多样性和生物量较高的海域。在这些区域,由于食物种类多样且密度高,斑海豹能够在短时间内捕获足够的猎物,从而提高觅食效率。高效的捕食使得斑海豹在觅食上花费的时间少,因此导致觅食移动持久性低^[42-43]。低移动持续性在觅食活动不激烈的情况下也可能表明了斑海豹的休息行为,其中,庙岛群岛、辽河口蚂蚁岛和虎平岛是斑海豹传统上岸点和休息区^[36-37]。上岸点附近通常是鱼类资源丰富的海域。斑海豹幼崽通常会有规律地表现低移动持久性行为,如在海上休息,这大约占它们在海上的时间的27%^[44]。此外,也不能排除因为饥饿和疲惫而在海面上停留更长时间^[28]。而在渤海中西部,斑海豹表现出高移动持续性。对于放归野外的斑海豹幼崽来说,这可能是一种探索(游荡)行为。当斑海豹幼崽离开放归点后,首先表现出一种探索行为,这在野外群体中也很常见^[45]。斑海豹幼崽首次进入海洋后,主要通过探索海洋环境来适应新的生活方式^[45-46]。此外在其他一些鳍足类和海鸟中也是常见的特征,如北海狗(*Callorhinus ursinus*)和灰头信天翁(*Thalassarche chrysostoma*)^[47-48]。随着时间推移和经验的积累,斑海豹的觅食行为持续时间逐渐缩短,运动变得更加曲折,在持续时间和距离上表现的更加一致。在辽东湾斑海豹群体迁出辽东湾向朝鲜半岛和彼得大帝湾迁移过程中,约一个月的时间内斑海豹表现出高移动持久性,说明在迁移过程中斑海豹进行较少的觅食和休息,这在迁移动物中是常见的现象^[49]。

Nowak 等人^[46]在研究灰海豹离开繁殖地过程中的行为模式时,发现野生个体与接受救助个体之间在运动表现上存在微小的差异。Carter 等人^[44]发现,野生灰海豹幼崽在离开出生地后的四个月内展现出了与成年海豹相似的运动模式。我们的研究表明,放归海豹在海上生活的最初两周内可能存在‘迷失’状态,但经过短时间调整后,它们的迁徙特征趋于稳定,这表明它们获得经验的速度非常快。

3.3 斑海豹保护建议

斑海豹和其他海洋哺乳动物的减少和消失势必会对未来全球海洋生态系统产生深远的影响^[50]。海水温度是影响斑海豹种群分布的重要环境因素,为有效制定适应气候变化的保护和管理策略,应对气候变化对斑海豹栖息地的适宜性的影响程度进行深入评估。海洋保护区是保护濒危物种和维护生态系统服务的有效工具^[51],为保护斑海豹及其栖息地,包括我国在内的一些国家和地区建立了海洋保护区^[52-53],如大连斑海豹国家级自然保护区、辽河口国家级自然保护区、庙岛群岛海豹省级自然保护区和俄罗斯远东海洋自然保护区。我国三个保护区在地理位置上的相对独立,在一定程度上导致了信息和经验交流的不足。加强保护区间的沟通与合作,形成跨区域的联动机制,可以在区域层面形成协同效应,确保发挥更大的保护作用。

除加强保护区的协同合作外,斑海豹潜在栖息地的发掘也是保护工作中的重要环节^[54]。为更好地对其进行保护,应深入调查和挖掘潜在栖息地,特别是那些尚未得到足够保护的区域。通过合理预测和评估栖息地适宜性,确定优先保护区域和潜在栖息地的开发方向,从而为斑海豹的长期保护奠定基础。此外,斑海豹的迁徙和繁殖行为也应引起足够关注,尤其是其在迁徙过程中可能面临的威胁,如捕捞作业和航运活动等的干扰,可设立季节性或阶段性的核心保护区和外围保护带,以减少对其生存和繁殖的影响。救助斑海豹放归后,应持续深入研究其对环境适应性、觅食行为及建立新栖息地能力等探索性行为。

4 结论

本研究基于6个环境数据和斑海豹信标跟踪数据构建了斑海豹的分布模型和SSM模型,预测斑海豹的适宜生境分布及其运动行为状态。研究表明海表温度是影响斑海豹分布的最重要环境因子,适宜栖息地

主要集中在渤海北部和东部海域、黄海北部、黄海东部和彼得大帝湾海域。斑海豹在渤海海域的觅食和休息行为主要发生在渤海东部、渤海海峡和彼得大帝湾海域。迁移过程中,斑海豹迁出渤海向朝鲜半岛和彼得大帝湾迁移过程中,表现出较低的移动持久性,运动状态主要为迁移。

参考文献 (References):

- [1] 韩家波, 鹿志创, 田甲申, 马志强, 王召会, 杨勇, 王勤国, 宋新然, 彭志平. 基于卫星信标跟踪的斑海豹放流效果研究. 兽类学报, 2013, 33(4): 300-307.
- [2] 王丕烈. 渤海斑海豹资源现状和保护. 水产科学, 1993, 12(1): 4-7.
- [3] Zhuang H F, Shao F, Zhang C, Xia W C, Wang S Q, Qu F Y, Wang Z L, Lu Z C, Zhao L L, Zhang Z H. Spatial-temporal shifting patterns and *in situ* conservation of spotted seal (*Phoca largha*) populations in the Yellow Sea ecoregion. Integrative Zoology, 2024, 19(2): 307-318.
- [4] 王丕烈, 韩家波, 马志强. 黄渤海斑海豹种群现状调查. 野生动物, 2008, 29(1): 29-31, 39.
- [5] 董金海, 沈峰. 辽东湾斑海豹历史种群数量的估计. 海洋科学, 1991, 15(3): 26-31.
- [6] 国家林业和草原局, 农业农村部. 《国家重点保护野生动物名录》(2021年2月1日修订). 野生动物学报, 2021, 42(2): 605-640.
- [7] Yan H K, Wang N, Wu N, Lin W N. Abundance, habitat conditions, and conservation of the largha seal (*Phoca largha*) during the past half century in the Bohai Sea, China. Mammal Study, 2018, 43(1): 1-9.
- [8] Lowerre-Barbieri S K, Kays R, Thorson J T, Wikelski M. The ocean's movescape: fisheries management in the bio-logging decade (2018-2028). ICES Journal of Marine Science, 2019, 76(2): 477-488.
- [9] Mller L M, Attard C R M, Bilgmann K, Andrews-Goff V, Jonsen I, Paton D, Double M C. Movements and behaviour of blue whales satellite tagged in an Australian upwelling system. Scientific Reports, 2020, 10: 21165.
- [10] Abrahms B, Hazen E L, Aikens E O, Savoca M S, Goldbogen J A, Bograd S J, Jacox M G, Irvine L M, Palacios D M, Mate B R. Memory and resource tracking drive blue whale migrations. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(12): 5582-5587.
- [11] Aarts G, MacKenzie M, McConnell B, Fedak M, Matthiopoulos J. Estimating space-use and habitat preference from wildlife telemetry data. Ecography, 2008, 31(1): 140-160.
- [12] Ferreira L C, Jenner C, Jenner M, Udyawer V, Radford B, Davenport A, Moller L, Andrews-Goff V, Double M, Thums M. Predicting suitable habitats for foraging and migration in Eastern Indian Ocean pygmy blue whales from satellite tracking data. Movement Ecology, 2024, 12(1): 42.
- [13] Panigada V, Bodey T W, Friedlaender A, Druon J N, Huckstädt L A, Pierantonio N, Degollada E, Tort B, Panigada S. Targeting fin whale conservation in the north-western Mediterranean Sea: insights on movements and behaviour from biologging and habitat modelling. Royal Society Open Science, 2024, 11(3): 231783.
- [14] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. 生态学报, 2015, 35(2): 557-567.
- [15] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 王然, 卫海燕, 王璐坤, 顾蔚, 李新. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势. 地球科学进展, 2020, 35(12): 1292-1305.
- [16] Hazen E L, Jorgensen S, Rykaczewski R R, Bograd S J, Foley D G, Jonsen I D, Shaffer S A, Dunne J P, Costa D P, Crowder L B, Block B A. Predicted habitat shifts of Pacific top predators in a changing climate. Nature Climate Change, 2012, 3(3): 234-238.
- [17] Krüger L, Ramos J A, Xavier J C, Grémillet D, González-Solís J, Petry M V, Phillips R A, Wanless R M, Paiva V H. Projected distributions of Southern Ocean albatrosses, petrels and fisheries as a consequence of climatic change. Ecography, 2018, 41(1): 195-208.
- [18] Patterson T A, Thomas L, Wilcox C, Ovaskainen O, Matthiopoulos J. State-space models of individual animal movement. Trends in ecology and evolution, 2008, 23(2): 87-94.
- [19] Jonsen I D, Grecian W J, Phillips L, Carroll G, McMahon C, Harcourt R G, Hindell M A, Patterson T A. aniMotum, an R package for animal movement data: Rapid quality control, behavioural estimation and simulation. Methods in Ecology and Evolution, 2023, 14(3): 806-816.
- [20] Jonsen I D, Flemming J M, Myers R A. Robust state-space modeling of animal movement data. Ecology, 2005, 86(11): 2874-2880.
- [21] Douglas D C, Weinzierl R, Davidson S C, Kays R, Wikelski M, Bohrer G. Moderating Argos location errors in animal tracking data. Methods in Ecology and Evolution, 2012, 3(6): 999-1007.
- [22] Aiello-Lammens M E, Boria R A, Radosavljevic A, Vilela B, Anderson R P. spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. Ecography, 2015, 38(5): 541-545.
- [23] Dormann C F, Elith J, Bacher S, Buchmann C, Carl G, Carré G, Marquéz J R G, Gruber B, Lafourcade B, Leitão P J, Münkemüller T, McClean C, Osborne P E, Reineking B, Schröder B, Skidmore A K, Zurell D, Lautenbach S. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. Ecography, 2013, 36(1): 27-46.
- [24] Kass J M, Muscarella R, Galante P J, Bohl C L, Pinilla-Buitrago G E, Boria R A, Soley-Guardia M, Anderson R P. ENMeval 2.0: Redesigned for customizable and reproducible modeling of species' niches and distributions. Methods in Ecology and Evolution, 2021, 12(9): 1602-1608.
- [25] 陈炳耀, 杨丛汶. 东亚江豚全球适宜栖息地分布预测. 南京师大学报: 自然科学版, 2024, 47(2): 76-83.
- [26] Nahm F S. Receiver operating characteristic curve: overview and practical use for clinicians. Korean Journal of Anesthesiology, 2022, 75(1): 25-36.
- [27] 翁慧莹, 刘益鹏, 杨黔越, 叶兴状, 毕远洋, 张国防, 陈世品, 刘宝. 福建柏地理分布及随气候变化的分布格局模拟. 生态学报, 2025,

- 45(1): 137-146.
- [28] Nowak B R, Bowen W D, Whoriskey K, Lidgard D C, Mills Flemming J E, Iverson S J. Foraging behaviour of a continental shelf marine predator, the grey seal (*Halichoerus grypus*), is associated with *in situ*, subsurface oceanographic conditions. *Movement Ecology*, 2020, 8: 41.
- [29] Jonsen I D, McMahon C R, Patterson T A, Auger-Méthé M, Harcourt R, Hindell M A, Bestley S. Movement responses to environment: fast inference of variation among southern elephant seals with a mixed effects model. *Ecology*, 2019, 100(1): e02566.
- [30] Kuncienė L, Nachtsheim D, Siebert U, Kleiva Ž. Ontogeny of horizontal movement patterns of rehabilitated grey seal juveniles (*Halichoerus grypus*) in the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1449023.
- [31] Grebmeier J M, Overland J E, Moore S E, Farley E V, Carmack E C, Cooper L W, Frey K E, Helle J H, McLaughlin F A, McNutt S L. A major ecosystem shift in the northern Bering Sea. *Science*, 2006, 311(5766): 1461-1464.
- [32] 周开亚. 中国动物志 兽纲第九卷. 北京: 科学出版社, 2004: 237-242.
- [33] Trukhin A M. Current status of the spotted seal (*Phoca largha*) population in the peter the great bay, sea of Japan. *Mammal Study*, 2024, 49(4): 257-271.
- [34] Eisner L, Hillgruber N, Martinson E, Maselko J. Pelagic fish and zooplankton species assemblages in relation to water mass characteristics in the northern Bering and southeast Chukchi seas. *Polar Biology*, 2013, 36(1): 87-113.
- [35] Woodson C B, Litvin S Y. Ocean fronts drive marine fishery production and biogeochemical cycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(6): 1710-1715.
- [36] Spies I, Gruenthal K M, Drinan D P, Hollowed A B, Stevenson D E, Tarpey C M, Hauser L. Genetic evidence of a northward range expansion in the eastern Bering Sea stock of Pacific cod. *Evolutionary Applications*, 2020, 13(2): 362-375.
- [37] 田甲申, 鹿志创, 罗耀明, 王召会, 张胜久, 韩家波. 应用碳氮稳定同位素研究斑海豹(*Phoca largha*)的食性. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3453-3458.
- [38] 马志强, 韩家波, 鹿志创, 田甲申, 吴景. 渤海金州湾石线岛海域斑海豹种群动态初步调查. *水产科学*, 2018, 37(5): 684-688.
- [39] 马志强, 韩家波, 姜大为, 张伟. 渤海虎平岛周围海域的斑海豹种群动态初步调查. *水产科学*, 2007, 26(8): 455-457.
- [40] Won C, Yoo B H. Abundance, seasonal haul-out patterns and conservation of spotted seals *Phoca largha* along the coast of Bak-ryoung Island, SouthKorea. *Oryx*, 2004, 38(1): 109-112.
- [41] Papastamatiou Y, DeSalles P, McCauley D. Area-restricted searching by *Manta* rays and their response to spatial scale in lagoon habitats. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 456: 233-244.
- [42] Allegue H, Réale D, Picard B, Guinet C. Track and dive-based movement metrics do not predict the number of prey encountered by a marine predator. *Movement Ecology*, 2023, 11(1): 3.
- [43] Yurkowski D J, Ferguson S, Choy E S, Loseto L L, Brown T M, Muir D C G, Semeniuk C A D, Fisk A T. Latitudinal variation in ecological opportunity and intraspecific competition indicates differences in niche variability and diet specialization of Arctic marine predators. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(6): 1666-1678.
- [44] Carter M I D, McClintock B T, Embling C B, Bennett K A, Thompson D, Russell D J F. From pup to predator: generalized hidden Markov models reveal rapid development of movement strategies in a naïve long-lived vertebrate. *Oikos*, 2020, 129(5): 630-642.
- [45] Peschko V, Müller S, Schwemmer P, Mercker M, Lienau P, Rosenberger T, Sundermeyer J, Garthe S. Wide dispersal of recently weaned grey seal pups in the Southern North Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 2020, 77(5): 1762-1771.
- [46] Nowak B V R, Bowen W D, den Heyer C E, Lang S L C, Lidgard D C. Ontogeny of movement patterns in naïve grey seal pups inhabiting a complex continental shelf ecosystem. *PLoS One*, 2023, 18(9): e0290707.
- [47] Frankish C K, Manica A, Clay T A, Wood A G, Phillips R A. Ontogeny of movement patterns and habitat selection in juvenile albatrosses. *Oikos*, 2022, 2022(6): e09057.
- [48] Ma L A, Johnson D, Melin S, Ream R, Gelatt T. Diving ontogeny and lunar responses in a highly migratory mammal, the northern fur seal *Callorhinus ursinus*. *Marine Ecology Progress Series*, 2010, 419: 233-247.
- [49] Chua M, Ho S Y W, McMahon C R, Jonsen I D, de Bruyn M. Movements of southern elephant seals (*Mirounga leonina*) from Davis Base, Antarctica: combining population genetics and tracking data. *Polar Biology*, 2022, 45(7): 1163-1174.
- [50] Kovacs K M, Aguilar A, Auriolles D, Burkanov V, Campagna C, Gales N, Gelatt T, Goldsworthy S D, Goodman S J, Hofmeyr G J G, Härkönen T, Lowry L, Lydersen C, Schipper J, Sipilä T, Southwell C, Stuart S, Thompson D, Trillmich F. Global threats to pinnipeds. *Marine Mammal Science*, 2012, 28(2): 414-436.
- [51] 王伟, 李俊生. 中国生物多样性就地保护成效与展望. *生物多样性*, 2021, 29(02): 133-149.
- [52] Witherell D, Woodby D. Application of Marine Protected Areas for Sustainable Production and Marine. *Marine Fisheries Review*, 2005, 67(1): 1-28.
- [53] Ma Z J, Chen Y, Melville D S, Fan J, Liu J G, Dong J W, Tan K, Cheng X F, Fuller R A, Xiao X M, Li B. Changes in area and number of nature reserves in China. *Conservation Biology*, 2019, 33(5): 1066-1075.
- [54] 陈星, 张立. 野生动物栖息地恢复研究进展及展望——基于文献计量数据分析. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2023, 59(4): 575-583.